



HAL
open science

Deep flooded karst of south-eastern France – Genesis and hydrodynamic functioning

Bruno Arfib, Ludovic Mocochain

► **To cite this version:**

Bruno Arfib, Ludovic Mocochain. Deep flooded karst of south-eastern France – Genesis and hydrodynamic functioning. *Karstologia*, 2022, Karsts and karstology in France in the 21st century, 79, pp.35-44. hal-03779651v2

HAL Id: hal-03779651

<https://hal.science/hal-03779651v2>

Submitted on 2 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

**Bruno ARFIB¹ et
Ludovic MOCOCHAIN²**

(1) Aix Marseille Univ, CNRS, IRD,
INRAE, Coll France, CEREGE,
Aix-en-Provence, France,
arfib@cerege.fr

(2) 1767 route des Puys,
05200 Puy-Sanières, France,
mocochain@gmail.com

Deep flooded karsts of south-eastern France – Genesis and hydrodynamic functioning

Karsts noyés profonds du sud-est de la France – Genèse et fonctionnement

ABSTRACT: The karstic massifs located along the Rhône Valley and the Mediterranean coast in the south-east France have a joint history linked to the Messinian Salinity Crisis. The drying up of the Mediterranean during the Messinian period and its re-flooding during the Pliocene caused an extraordinary oscillation of the base level. During this event, a large number of karsts were deepened, controlled by the drop of the base level, and then flooded when the Mediterranean level rose. This paper presents the consequences of large variations of the base level on the speleogenesis and hydrodynamics of the karst, using three emblematic examples. The Ardèche karst on the immediate edge of the Messinian canyon of the Rhône River, where the karst networks have been tiered from bottom to top and can be interconnected by ascending lifts: the “chimney-shaft”. The Monts-de-Vaucluse karst on the left bank of the Rhône valley, drained by a major outlet, the Fontaine-de-Vaucluse spring, which karst network develops to more than 300 m below the base level. The coastal karst of Port-Miou, nowadays drained by a brackish coastal submarine spring, outlet of a deep groundwater flow below sea level (explored at more than 230 m deep) allowing a deep saline intrusion. All these deep karst networks have remained active since their formation and constitute a strategic water resource in a region threatened in the medium term by increasingly significant water deficits linked to climate change.

KEYWORDS: Base level, Messinian Salinity Crisis, Mediterranean sea, deep flooded karst, per ascensum karst formation, saline intrusion.

RÉSUMÉ: Les massifs karstiques situés le long de la vallée du Rhône et en zone côtière méditerranéenne dans le sud-est de la France ont une histoire commune en lien avec la Crise de Salinité Messinienne. L’assèchement de la Méditerranée au Messinien et sa remise en eau au Pliocène ont provoqué une variation hors normes du niveau de base. Au cours de cet événement, un grand nombre de karsts profonds se sont creusés sous le contrôle de la chute du niveau de base, puis ont ensuite été ennoyés lors de la remontée du niveau de la Méditerranée. Cet article propose d’exposer les conséquences des variations de grande amplitude du niveau de base sur la genèse et le fonctionnement hydrodynamique des réseaux karstiques à travers trois exemples emblématiques. Le karst de l’Ardèche en bordure immédiate du canyon messinien du Rhône, où les réseaux se sont étagés du bas vers le haut, et peuvent être interconnectés par des puits ascendants : les puits-cheminées. Le karst des Monts de Vaucluse en rive gauche de la vallée du Rhône, drainé par un exutoire majeur, la Fontaine de Vaucluse qui plonge à plus de 300 m de profondeur. Le karst littoral de Port-Miou, aujourd’hui drainé par une source côtière sous-marine saumâtre, exutoire d’un écoulement profond sous le niveau marin (reconnu à plus de 230 m de profondeur) permettant une intrusion saline profonde. Ces réseaux karstiques profonds sont restés actifs depuis leur formation et constituent une ressource en eau stratégique dans une région menacée à moyen terme par des déficits hydriques de plus en plus importants en lien avec le réchauffement du climat.

MOTS-CLÉS : Niveau de base, Crise de Salinité Messinienne, Méditerranée, karst noyé profond, étagement per ascensum, intrusion saline.

Introduction

Deep Flooded Karst (DFK) is defined by the existence of one or several karst conduits at great depth in the saturated zone, below the recent variations of the base level. Literature does not really mention a threshold depth beyond which the term deep flooded can be used. In this paper, karsts deeper than 130 to 150 meters below sea level have been investigated to be out of the Pleistocene eustatic variations that may have influenced the development of coastal and hinterland karsts.

The periphery of the Mediterranean Sea shows many examples of DFK especially in the south of France. Several

Introduction

Un karst noyé profond (KNP) se définit par l’existence d’un ou plusieurs conduits se situant en zone saturée, à des profondeurs nettement supérieures aux variations récentes du niveau de base. La littérature ne fait pas vraiment état d’un seuil de profondeur au-delà duquel le terme « noyé profond » peut être utilisé. Pour les exemples présentés dans ce travail, ce seuil sera placé sous la profondeur de 130 à 150 m sous le niveau marin actuel, afin de s’affranchir des variations eustatiques du Pléistocène, lesquelles ont pu influencer la formation de certains karsts littoraux.

models are proposed to explain the genesis of DFK: hypogenic process, ghost-rock process, artesianism, tectonic subsidence, base level variations, Four State Model... The dominant model of karst speleogenesis around the Mediterranean Sea is related to the base level variations, and particularly to the huge amplitude approaching 1500 m reached during the Messinian Salinity Crisis (MSC). This extraordinary geological event caused a break in the regional geological history. In 1 500 years, the Mediterranean Sea level dropped by more than 1 500 m [Ryan, 2009] following the desiccation of the Mediterranean Sea. The main Mediterranean rivers and their tributaries then downcutted deep canyons following the sea level drop. As an example, the Rhône River (France) dug a canyon more than 1 000 m deep at its present estuary (figure 1). On the other side of the Mediterranean Sea, the Nile canyon (Egypt) reached 2 000 m deep. The duration of the MSC has been estimated to 150,000 years and ended at 5.45 Ma when the Mediterranean Sea was quickly flooded [Bache et al., 2015]. This event gave a marine transgression of an amplitude equivalent to the desiccation (i.e. 1 500 to 2 000 m), and provoked a generalized flooding of the Messinian canyons [Chumakov, 1973; Clauzon, 1982]. For the Rhône River, the Mediterranean shoreline moved more than 300 km to the north (over the latitude of the city of Lyon), and for the

L'aire de drainage de la Méditerranée compte de très nombreux exemples de KNP et particulièrement dans le quart sud-est français. Plusieurs modèles sont proposés dans la littérature pour expliquer la genèse des karsts noyés profonds : remontées hypogènes, fantômisation, artésianisme, subsidence tectonique, variations du niveau de base, Four State Model... En Méditerranée, le rôle du niveau de base et de ses variations est le modèle qui s'est imposé pour expliquer la formation de très nombreux KNP apparus au cours de la crise de salinité messinienne (CSM). Cet événement géologique hors normes marque une césure profonde dans l'histoire géologique régionale. En seulement 1 500 ans, le niveau marin méditerranéen s'est effondré de plus de 1 500 m [Ryan, 2009] sous l'effet de l'évaporation du plan d'eau isolé de l'océan Atlantique. Les grands fleuves méditerranéens et leurs principaux affluents ont alors creusé de profonds canyons en suivant la chute du niveau marin. À titre d'exemple, le creusement du Rhône a dépassé 1 000 m de profondeur au droit de son embouchure actuelle (figure 1). De l'autre côté de la Méditerranée, le canyon du Nil a atteint 2 000 m. Le creusement de tels canyons a eu pour effet de répercuter très loin dans les terres l'effet de l'effondrement du plan d'eau marin. La durée de la crise de salinité a été estimée à 150 000 ans et prit fin à 5,45 Ma lors d'une violente remise en eau de la Méditerranée [Bache et al., 2015]. Il s'agit d'une ingression marine d'une amplitude équivalente à l'assèchement (i.e. 1 500 à 2 000 m). Lors de cette remise en eau, les canyons messiniens ont également été ennoyés répercutant *ipso facto* cette remontée du niveau marin très loin dans les terres [Chumakov, 1973 ; Clauzon, 1982]. Pour le Rhône (France), la Méditerranée est remontée à plus de 300 km au nord de son embouchure actuelle (jusqu'aux environs de la ville de Lyon), et pour le Nil, cette ingression a dépassé le barrage d'Assouan en Egypte, c'est-à-dire à plus de 1 000 km de son embouchure actuelle. Une telle variation du niveau marin (plus de 1 500 m d'amplitude), relayée à terre par le creusement des canyons, a fourni un fort gradient hydraulique qui a favorisé le développement de karsts en relation avec un niveau de base très bas, et qui dépasse toutes les profondeurs mesurées des KNP méditerranéens.

La variation du niveau marin ne peut être l'unique facteur de karstification, chaque karst étudié montre

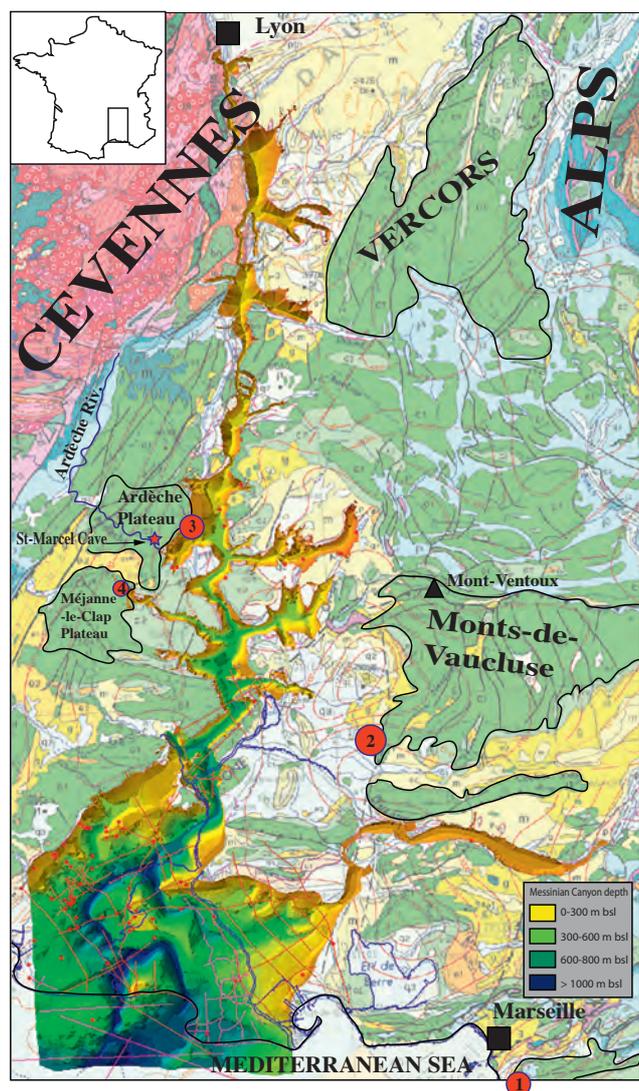


Figure 1 : 3D view of the buried part of the Rhône and Durance Messinian Canyons in the south of France. This view is superimposed on the French Geological map (millionth map). Main karstic areas (Urgonian limestones) are surrounded by black line. Main deep flooded karsts springs are located by a red circle (1: Port-Miou Spring, 2: Fontaine de Vaucluse Spring, 3 & 4: Goul de la Tannerie spring and Goul du Pont Spring, 5: Marnade Spring; from Roure et al., 2009, modified). Restitution 3D de la partie enfouie du canyon messinien du Rhône dans le Sud-Est de la France. Cette restitution est superposée sur le fond géologique au millionième. Les principaux massifs karstiques (calcaires urgoniens du Crétacé inf.) sont entourés en noir. Les principales émergences des karsts noyés profonds sont localisées par un cercle rouge (1 : source sous-marine de Port-Miou, 2 : Fontaine de Vaucluse, 3 & 4 : émergences des Goul de la Tannerie et Goul du Pont, 5 : source de la Marnade ; d'après Roure et al., 2009, modifié).

Nile this transgression overpassed the Aswan Dam more than 1000 km from the current mouth. This huge sea level variation, forwarded inland by the canyons, provided high hydraulic gradients, which foster karst development. It also provided a very low base level, which had exceeded the depth of all Mediterranean DFK.

Sea level variation and related base level variation cannot be the single contributing factor in karstification. Each studied karst also shows the importance of geologic local controls without which karstification would have been different. Nevertheless, the base level variation during the MSC is a striking feature in the genesis of karsts close to the Rhône Valley and along the French Mediterranean coastline.

Using three emblematic examples in south-eastern France, this paper shows, on the one hand, the geometry and the formation of DFK in relation to the Mediterranean base level, and on other hand, the impact of deep karstic networks on current groundwater flows in coastal areas. Ardèche and Fontaine-de-Vaucluse karsts illustrate the karst network speleogenesis, and Port-Miou brackish submarine spring exemplifies the DFK hydrodynamic in coastal area.

I. The Mid'Rhône valley karsts: the Ardèche Plateau and Fontaine-de-Vaucluse Spring

Lower Cretaceous limestones -Barremian Period with Urgonian facies- are ubiquitous in southeastern France (green color on the figure 1). This large carbonate platform has recorded a complex geodynamic history with burial, phases of uplift and subsidence. Today the geomorphological contexts can be very different between each karstic massif of the same limestone facies. Thus, Urgonian limestones on the left bank of the Rhône valley are in the position of alpine piedmont and can exceed 1500 m of elevation. Landscapes are mountainous and relatively rugged (e.g. Vercors Mountains) or look like plateaus between 800 and 1000 m of elevation (e.g. Monts-de-Vaucluse Plateau and Mont-Ventoux Mountain; figure 1 and figure 2). Same limestones on the right bank of the Rhône valley (Ardèche) occupy the piedmont position of Cévennes mountains. Elevation of these massifs are much lower (around 300 m asl) and landscapes correspond to flat plateaus that overlook karstic canyons and fluvial plains. These landscape differences have been at the origin of very different karstic developments. For the Ardèche Plateau the karst network is tiered in several horizontal levels. This main characteristic was acquired under the control of the base level positions [MocoCHAIN *et al.*, 2006; MocoCHAIN *et al.*, 2009]. The case of the Monts-de-Vaucluse mountains is different because the karst networks evolution is a consequence of the alpine tectonic uplift [Dal Soglio, 2019]. The elevation range of the network's development is very significant and their morphologies present successions of meanders and shafts typical of mountainous regions.

There is however a common feature to these both regions: the existence of DFKs. There are deep flooded karst networks below current fluvial plains on both sides of the Rhône Valley. Speleological dives have reached a depth of 240 m below the spring for the Ardèche Plateau (Goul du Pont Spring by X. Meniscus), and 310 m deep

également l'importance de facteurs locaux sans le concours desquels la karstification aurait été différente. Malgré tout, cette forte variation du niveau de base est un trait marquant de la genèse des karsts de la vallée du Rhône et du littoral méditerranéen.

Au travers d'exemples emblématiques, cet article a pour objectif de montrer d'une part la géométrie et la mise en place des KNP en lien avec la Méditerranée, et d'autre part l'impact de la géométrie des réseaux karstiques profonds sur l'écoulement actuel de l'eau souterraine en zone côtière. Les KNP de l'Ardèche et de Fontaine de Vaucluse seront présentés en exemple de structuration de réseaux, puis le karst de Port-Miou (actuellement drainé par une source sous-marine saumâtre) sera présenté en exemple de fonctionnement hydrodynamique de ces KNP en zone côtière.

I. Les karsts de la vallée du Rhône : l'Ardèche et la Fontaine de Vaucluse

Les calcaires du Crétacé inférieur (Barrémien à faciès urgonien) sont omniprésents dans le sud-est de la France (en vert sur la figure 1). Du nord au sud et d'est en ouest, cette large plateforme carbonatée a connu une histoire géodynamique complexe entre enfouissement, phases de surrection, de subsidence, tectonique cassante et plicative. Aujourd'hui pour un même faciès de calcaire, les contextes géomorphologiques peuvent être très différents d'un massif à l'autre. Ainsi, en rive gauche de la vallée du Rhône, les calcaires de l'Urgonien sont en position de piedmont alpin et leurs altitudes peuvent dépasser les 1500 m. Les paysages sont montagnards et relativement accidentés (cas du Vercors) ou peuvent s'apparenter à des causses entre 800 et 1000 m d'altitude (cas des Monts-de-Vaucluse ; figures 1 et 2). À l'ouest de la vallée du Rhône, en Ardèche ces mêmes calcaires sont en position de piedmont cévenol. Leurs altitudes sont nettement plus basses (en moyenne 300 m) et les paysages sont ceux de bas plateaux qui dominent des canyons karstiques et des larges plaines. Ces différences paysagères vont être à l'origine de développements karstiques très différents. En Ardèche les réseaux spéléologiques sont largement horizontaux et étagés, ces caractéristiques ont été acquises sous l'influence directe du niveau de base et de ses variations [MocoCHAIN *et al.*, 2006 et 2009]. Dans le cas des Monts de Vaucluse et de la Fontaine de Vaucluse, l'évolution des réseaux est une conséquence de la surrection tectonique des massifs [Dal Soglio, 2019]. La dénivellation des réseaux est très importante et leur morphologie présente des successions de méandres et de puits typiques des régions montagneuses.

Il existe pourtant un point commun à ces deux régions, l'existence de KNP. D'un côté comme de l'autre de la vallée du Rhône, il existe des réseaux profonds sous le niveau des plaines alluviales. En Ardèche, les plongées spéléologiques ont atteint la profondeur de 240 m (émergence du Goul du Pont par X. Meniscus) et dans les Monts de Vaucluse, l'émergence de la Fontaine de Vaucluse a été reconnue jusqu'à la profondeur de 310 m.

A. L'histoire du karst de l'Ardèche

À titre d'exemple, le réseau de Saint-Marcel (en rive gauche du canyon de l'Ardèche ; figure 1) forme un système

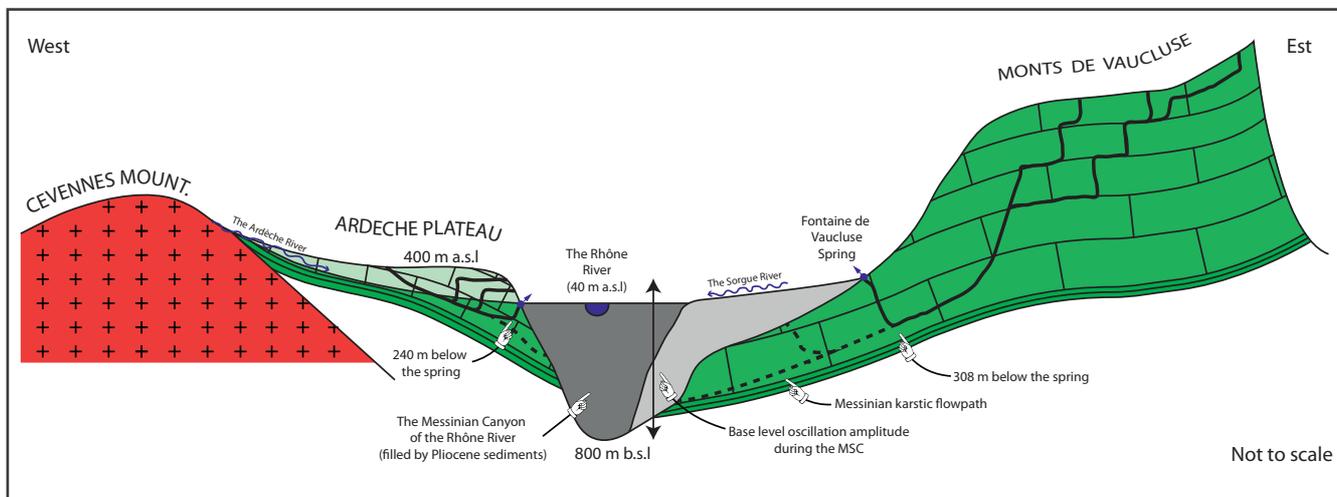


Figure 2 : Schematic cross-section showing the geologic and geomorphologic environments of the Ardèche karst (right bank of the Rhône Messinian Canyon) and the Monts-de-Vaucluse karst (left bank of the Rhône Messinian Canyon). This sketch illustrates geometric relationships between each type of karst (low elevation plateau vs. high elevation plateau) and base level oscillations during the MSC (from Bigot J.Y., unpublished). Coupe schématique illustrant les différents contextes géomorphologiques et géologiques entre l'Ardèche (en rive droite du Rhône) et les Monts de Vaucluse (en rive gauche du Rhône). Ce schéma permet de voir les relations géométriques existantes entre ces deux karsts et le canyon messinien du Rhône (d'après Bigot J.Y., non publié).

in the Fontaine-de-Vaucluse Spring in the Monts-de-Vaucluse karst.

A. The Ardèche karst evolution

As an example, the Saint-Marcel Cave on the left bank of the Ardèche canyon (figure 1) forms a karst network with flooded conduits (60 m below the Ardèche River elevation) and abandoned and tiered karst conduits connected by shafts. These connections by shafts show a polyphase evolution of the karst. The particularity of this karst is that its phase 1 corresponds to the formation of the DFK, and phase 2 corresponds to a *per ascensum* terracing of horizontal networks [Mocochain et al., 2006; 2011]. Indeed, phase 1 occurred during the MSC event by the formation of deep networks towards the bottom of the Messinian Canyons. Phase 2 then occurred during the Pliocene Period (between 5.32 and 2 Ma) when valleys were submerged by the Mediterranean Sea Flooding, and then by the slow sedimentary filling of the valleys. This generalized behavior, with rise of the base level (flooding and sedimentary filling) induced a continuous readjustment of the groundwater flow by a *per ascensum* terracing of karst networks (figure 3).

B. The Monts-de-Vaucluse karst and Fontaine-de-Vaucluse Spring

Unlike the Ardèche karst, the Monts-de-Vaucluse karst predates the MSC event. This karst acquired alpine karst morphologies already before the MSC. The karst network was deepened by the incision of the Rhône Canyon during the MSC. At the beginning of the Pliocene, the flooding of the valleys submerged the deep part of this karst, and forced it to adapt by the development of a phreatic lift rising to the Fontaine-de-Vaucluse spring. This case-study has given the international geomorphologic term “vauclisian spring”, use to describe a vertical karst conduit discharging groundwater to a spring. In this example, and on the contrary to the Ardèche, the valleys' infilling phase did not have any

composé de conduits noyés (-60 m sous le niveau de l'Ardèche) et de galeries abandonnées et étagées connectées par des conduits verticaux. Ces connexions témoignent d'une évolution polyphasée qui s'est imprimée dans le karst. L'originalité de cette histoire est que sa phase 1 correspond au creusement des KNP et que sa phase 2 correspond à un étagement *per ascensum* des réseaux horizontaux [Mocochain et al., 2006]. En effet, la phase 1 s'est produite au cours de la CSM par le creusement de réseaux profonds en direction du fond des canyons messiniens. La phase 2 est ensuite intervenue tout au long du Pliocène (entre 5,32 et 2 Ma) lorsque les vallées furent submergées par le reflooding de la Méditerranée puis par le lent colmatage sédimentaire des vallées. Ce comportement remontant généralisé du niveau de base (reflooding et colmatage) a favorisé une réadaptation continue des drainages par étagement *per ascensum* des réseaux (figure 3).

B. L'histoire du karst de Fontaine de Vaucluse

À la différence du karst de l'Ardèche, le karst des Monts de Vaucluse est bien antérieur à la CSM. Ce karst avait déjà une physiographie de karst alpin sur une grande dénivellation. Lors de la CSM, ce karst a connu un approfondissement important provoqué par le creusement du canyon du Rhône. Lors de l'ennoiement des vallées, la partie profonde s'est retrouvée submergée et contrainte à une adaptation par mise en place d'un conduit ascendant jusqu'à la source de la Fontaine de Vaucluse. Ce type de morphologie caractéristique est aujourd'hui nommée de manière générique : source vauclusienne. Dans cet exemple, et contrairement à l'Ardèche, les phases de remblaiement des vallées n'ont pas eu de répercussion importante sur la restructuration des réseaux. En effet, les altitudes de ces réseaux étaient bien au-dessus des amplitudes atteintes par le remblaiement des vallées. Seule la partie aval et profonde créée durant la CSM a eu une adaptation *per ascensum* [Mocochain et al., 2011].

huge consequences on the restructuring of old networks. Indeed, the altitudes of these karst networks were above the amplitudes reached by the valleys' sedimentary filling. Only the deep part created during the MSC experienced a *per ascensum* adaptation [Mocochain et al., 2011].

In both cases, the two keys factors that conditioned the evolution of these karsts were 1/ the relative elevation of each karstic landscape in relation to the base level (here the Rhône River) and 2/ the proximity of the Rhône Messinian Canyon for the formation of DFKs (figure 2).

II. A deep Mediterranean karst affected by saline intrusion: the Port-Miou karst

The DFK of Port-Miou is another example of karst whose genesis was subject to the evolution of its base level, in this case the Mediterranean Sea level itself. The examples of Ardèche and Fontaine de Vaucluse karst showed that karst networks were constrained to find new points of groundwater outflow due to the rise of their base level. This model also applies to karst located in coastal areas. Here, the water from the continent is drained by coastal springs, generally submarine. These submarine groundwater discharges (SGD) are commonly observed all around the Mediterranean [Fleury et al., 2007; Tulipano et al., 2005], at karstic submarine springs whose depth does not exceed a few tens of meters. Upstream to the springs, water flows through the DFK, down to several hundred meters

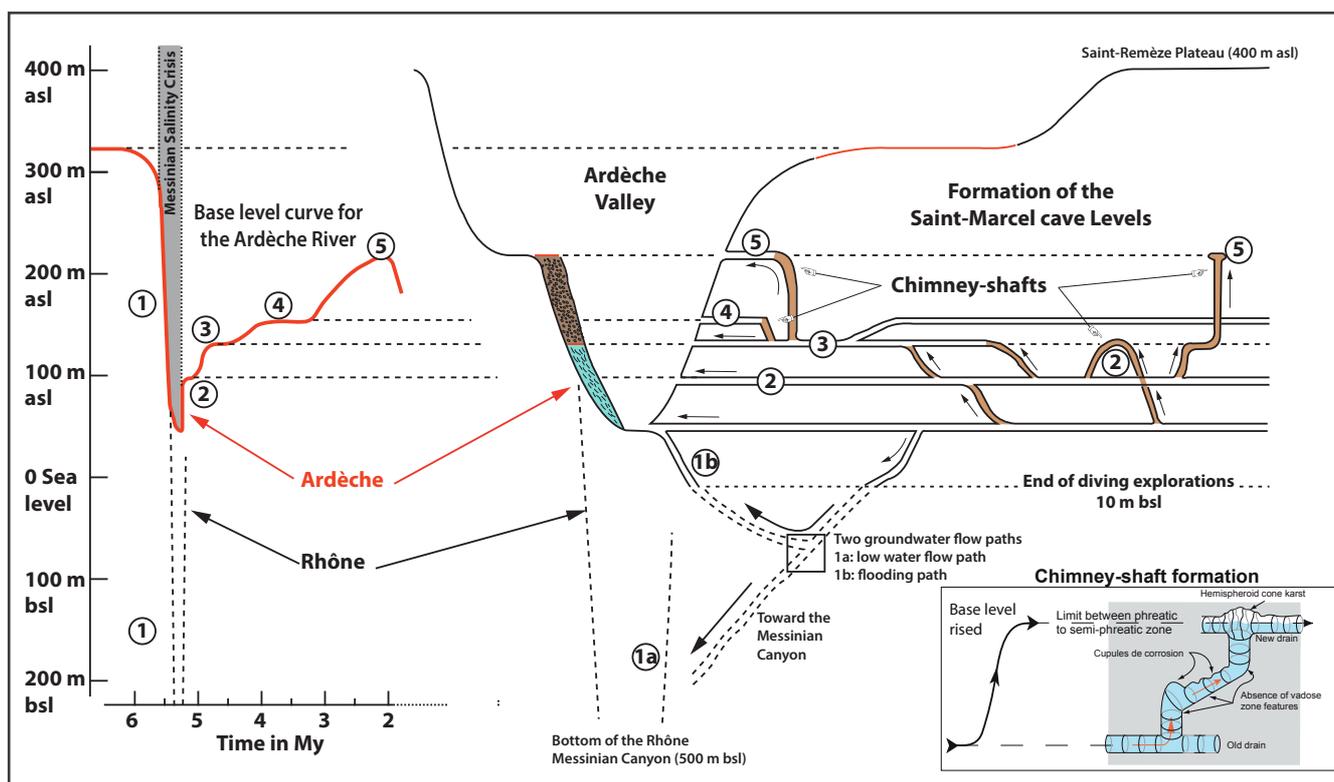
Dans un cas comme dans l'autre, les deux éléments clés qui ont conditionné l'évolution de ces karsts sont 1/ l'altitude relative des calcaires vis-à-vis de leur niveau de base (ici le Rhône) et 2/ la proximité du canyon messinien du Rhône pour la mise en place des KNP (figure 2).

II. Un karst profond méditerranéen soumis à l'intrusion saline : le karst de Port-Miou

Le KNP de Port-Miou est un autre exemple de karst dont la formation a été soumise à l'évolution de son niveau de base, ici le niveau marin méditerranéen. Les exemples des karsts de l'Ardèche et de Fontaine de Vaucluse ont montré que les réseaux karstiques ont été contraints par les remontées du niveau de base à trouver de nouveaux points d'émergences. Ce schéma s'applique également pour les karsts encore situés en zone côtière. Ici, l'eau du continent est drainée par des sources côtières, généralement sous-marines. Ces venues d'eau sous-marine en mer (SGD en anglais : submarine groundwater discharge) sont classiquement observées tout autour de la Méditerranée [Fleury et al., 2007 ; Tulipano et al., 2005] au niveau de sources karstiques dont la profondeur ne dépasse pas quelques dizaines de mètres. En amont des sources, l'eau emprunte le KNP, jusqu'à plusieurs centaines de mètres sous le niveau actuel de la mer, et peut ainsi rencontrer l'eau de mer qui envahit les aquifères côtiers. Ce type de transit est favorable à la contamination des eaux souterraines

Figure 3 : Schematic cross section showing the main levels of the Saint-Marcel cave network versus the base level curve produced by Mocochain et al. (2009). Deepest karst (now flooded) was formed during the MSC (step 1). The horizontal upper levels were formed by successive higher stages of the base level during the Pliocene period. Groundwater flows remained active in the deep phreatic networks, with final phreatic lift through chimney-shafts.

Coupe schématique des galeries du réseau de Saint-Marcel mise en parallèle de la courbe d'évolution du niveau de base extraite des travaux de Mocochain et al. (2009). Les réseaux noyés profonds se sont mis en place au cours de la crise de salinité (étape 1). Les réseaux horizontaux se sont mis en place au cours des remontées successives du niveau de base au cours du Pliocène (étapes 2 à 5). Au cours de cette dynamique du niveau de base, les réseaux enfouis continuaient de fonctionner par l'intermédiaire d'écoulement par des conduits remontants : les puits-cheminées.



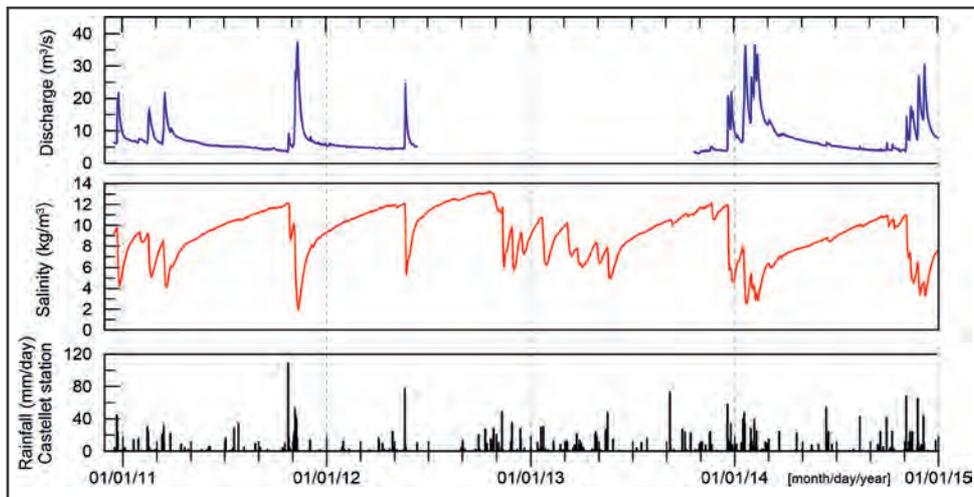


Figure 4 : Time series of the daily mean discharge rate and salinity of the brackish spring monitored at the Port-Miou underground dam from 2011 to 2015. Rainfall is measured at the Castellet Météo-France station located in the southern part of the recharge area. Data presented in Claude et al. 2019.

Évolution au cours du temps du débit moyen journalier et de la salinité de l'eau mesurés au barrage souterrain de Port-Miou entre 2011 et 2015. La pluie est mesurée à la station Météo-France du Castellet dans la zone sud du bassin versant. Données présentées dans Claude et al. 2019.

below present sea level, and may thus cross the zone of saline intrusion encroaching the coastal aquifer. The deep karst groundwater flow increases the contamination of continental fresh groundwater by saline intrusion, thus generating brackish springs.

Submarine springs are generally located at shallow depths, which can be explained by two major phenomena: (1) Sea water, which is denser than fresh water, applies a greater pressure depending on the height of the water column. This pressure forces the groundwater to emerge where the seawater column is the smallest. (2) The presence of marine and intra-karstic sediments decreases the permeability of the karstic network at depth. These submarine springs constitute major water discharge but also

continentales par des intrusions marines, formant ainsi des sources saumâtres.

Les émergences en mer se localisent en général à faible profondeur, ce qui s'explique par deux phénomènes majeurs : (1) L'eau de mer, plus dense que l'eau douce, exerce une pression plus importante en fonction de la hauteur de la colonne d'eau. Cette pression force l'eau souterraine à chercher un point d'émergence là où la colonne d'eau de mer est la plus petite. (2) La présence de sédiments marins et intra-karstiques viennent diminuer la perméabilité du réseau de conduits karstiques en profondeur. Ces sources sous-marines constituent des zones d'apport majeurs d'eau mais également de nutriments à la Méditerranée, ici dans les calanques de Marseille [Tamborski et al., 2020], et

Figure 5 : Schematic cross section of the coastal karst and of the submarine karstic spring of Port-Miou, explored by cave-diving up to 2000 meters from the sea and 233 m deep. The underground submarine dam is located 500 m inland from the sea. Deep saline intrusion was revealed by continuous CTD measurements at the dam and during the dives.

Coupe schématique du karst de la source sous-marine de Port-Miou explorée en plongée-spéléo à plus de 2000 mètres de la mer et 233 mètres de profondeur. Le barrage souterrain se trouve à 500 mètres de la mer. L'intrusion saline profonde a été mise en évidence par les mesures CTD en continu au barrage et lors des plongées.

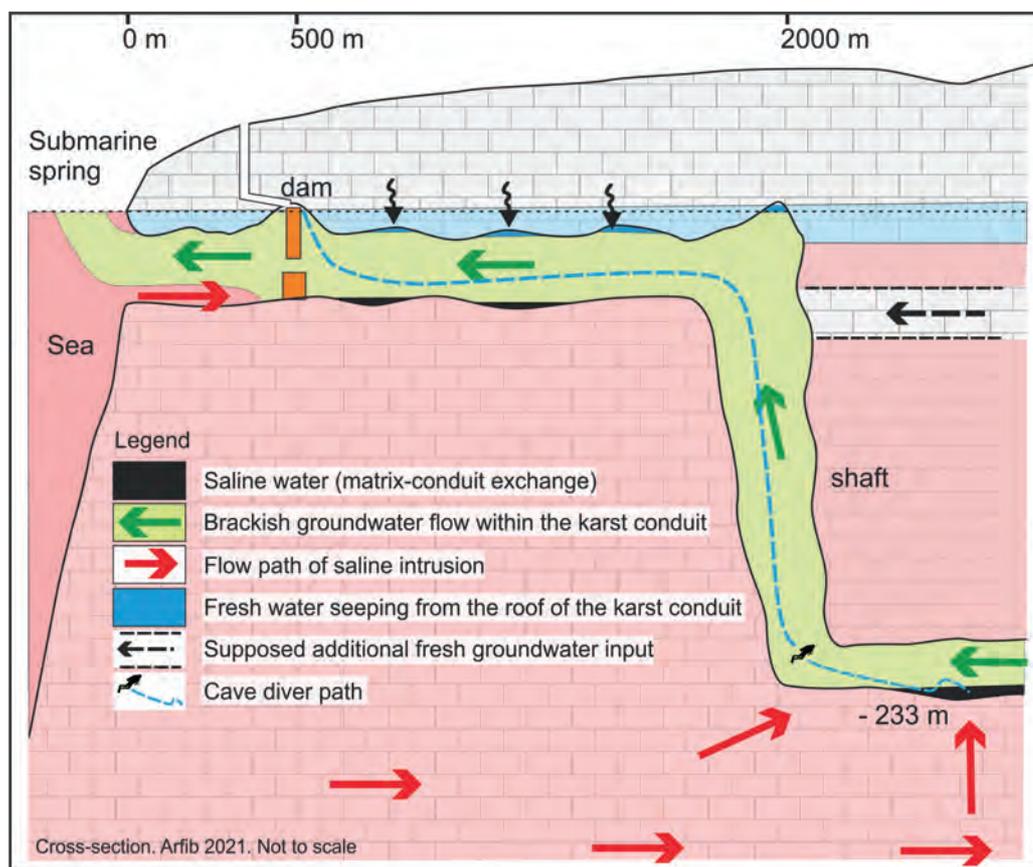


Figure 6: Photo of the Port-Miou underground dam located 500 meters inland from the sea. The scientist lays on the spillway of the dam, watching the water table upstream during a high-water event (November 7, 2011).

Photo du barrage souterrain de Port-Miou situé à 500 m de la mer dans les terres. Le personnage se trouve sur le déversoir du barrage, pendant que l'eau est en charge en amont, le 7 novembre 2011 durant une crue.



nutrient input to the Mediterranean, here in the *Calanques de Marseille* [Tamborski et al., 2020], and more generally all around the Mediterranean, such as in southern France [Bejannin et al., 2020] and Spain [Rodellas et al., 2015; Garcia-Solsona et al., 2010].

The Port-Miou submarine spring belongs to the SGD source in the *Calanques* area between Marseille and Cassis, which drains a large part of the carbonate aquifer located in *Lower-Provence* [Arfib and Charlier, 2016; Bejannin et al. 2017; Cavalera, 2007]. It is the main coastal outlet of southeastern France. It presents outstanding characteristics: (a) A recharge area of more than 400 km². (b) A multilayer aquifer that extends over several geological units of Lower-Provence. Some of these units overlap, forming a pile of carbonate rocks more than 2000 meters thick [Fournillon, 2012; Bestani, 2016]. (c) An average annual flow of several m³/s, with flood peaks that reach at least 50 m³/s (figure 4), and low flow in the range 1 to 3 m³/s. (d) A flooded karstic network explored by cave-diver over 2 km inland, ending with a shaft more than 233 m deep below the sea level [Meniscus 2017; figure 5].

One of the main properties of karstic submarine coastal springs is their salinity, varying with discharge to the sea. To limit the effect of direct saline intrusion, an underground dam was built inland, 500 m from the sea in the 1960s in the karst conduit of Port-Miou (figure 5, figure 6). This man-made construction provides artificial access to the karst network and allows continuous physico-chemical and biological in-situ monitoring. As opposed to porous media, saline intrusion does not have the simple shape of a salt wedge in coastal karst. Karst conduits can provide direct saltwater inflow, as observed in the Port-Miou conduit open to the sea (figure 5). Saline intrusion can also be diffuse at depth in the fissured and porous matrix of the limestones. Figure 4 shows the water salinity time-series recorded at the underground dam of Port-Miou. Salinity is variable, with a maximum during low flow periods and minimum during floods. This salinity does not come from the direct encroachment of seawater in the karst conduit connected to the submarine spring. It is acquired far upstream in the

plus généralement sur les différents sites étudiés présentés dans la littérature, par exemple sur le sud de la France et l'Espagne [Bejannin et al., 2020 ; Rodellas et al., 2015 ; Garcia-Solsona et al., 2010].

La source de Port-Miou appartient au complexe de venues d'eau sous-marines des calanques de Marseille à Cassis, qui drainent une partie de la Basse-Provence calcaire [Arfib and Charlier, 2016 ; Bejannin et al., 2017 ; Cavalera, 2007]. Elle est le principal exutoire côtier du sud-est de la France. Elle présente des caractéristiques remarquables : (a) Un bassin versant de plus de 400 km². (b) Un aquifère complexe qui s'étend sur plusieurs unités géologiques de la Basse-Provence. Certaines de ces unités se chevauchent, formant un empilement de roches carbonatées de plus de 2000 mètres d'épaisseur [Fournillon, 2012 ; Bestani, 2016]. (c) Un débit moyen annuel de plusieurs m³/s, avec des pics de crue qui atteignent a minima 50 m³/s (figure 4), et des débits d'étiage de l'ordre de 1 à 3 m³/s. (d) Un réseau karstique noyé exploré en spéléo-plongée sur environ 2 km et qui se termine par un puits de plus de 233 m de profondeur sous le niveau de la mer [Meniscus, 2017 ; figure 5].

La particularité du fonctionnement hydrodynamique des sources karstiques côtières réside dans la salinité de l'eau acquise avant leur émergence en mer. Pour limiter l'effet des contaminations salines, un barrage souterrain a été construit à 500 m en amont du littoral dans les années 1960 à Port-Miou (figures 5 et 6). Cette infrastructure offre un accès artificiel au réseau karstique et permet de faire des mesures physico-chimiques et biologiques en continu. À la différence des milieux poreux, l'intrusion saline n'a pas uniquement la forme simple d'un biseau salé. Les conduits karstiques peuvent être le lieu d'une intrusion saline directe, comme cela s'observe sur le conduit de Port-Miou ouvert sur la mer (figure 5). L'intrusion saline peut également envahir l'aquifère en profondeur dans la matrice fissurée et poreuse de l'encaissant calcaire. La figure 4 montre l'évolution de la salinité de l'eau de Port-Miou mesurée au barrage au cours du temps. La salinité est variable, maximale durant les périodes de faible débit, et

aquifer. Exceptional measurements were carried out with the help of cave-divers, who carried a CTD probe during deep dives in the ending shaft. The results of one of the dives are shown in figure 7, down to a depth of 233 meters in the heart of the karst. The salinity of the water was almost constant over the whole horizontal conduit (specific electric conductivity close to 17 mS/cm, equivalent to a salinity of 10 g/l) up to 2 km from the sea, as well as in the deep shaft (-233 m). The dive ended at the bottom of the shaft, where the karstic shaft turns to horizontal. A salt-water body lays on the floor (EC = 36 mS/cm, salinity = 23 g/l), explained by diffuse deep saline intrusion (figure 5). The groundwater flow in the karst network several hundred meters below present sea level forces the continental initially fresh water to meet the diffuse saline intrusion zone within the aquifer. Then, once the mixing is achieved between the two water bodies, the brackish water remains confined in the karstic conduit to the submarine spring, governed by the hydraulic gradient specific to the karstic conduit system. Figure 4 also shows that during floods, the salinity never reaches zero. This is one of the characteristics of the Port-Miou karst, the increase in hydraulic head never totally blocks the deep saline intrusion. However, on other deep karst systems in coastal areas, the spring water may become fresh during high water events [see the numerous references in Fleury et al. 2007].

Conclusion

Beyond the examples presented in this work, the development of Deep Flooded Karst (DFK) in connection with the Messinian Salinity Crisis is a joint characteristic of a large part of the peri-Mediterranean karsts. One of the conclusions reached in recent years was to understand the role of base level (BL) variation in the formation of DFK. By variation, we mean the fall and rise of the BL. To illustrate this structuring role of BL variation, we presented examples of karst in southeastern France, belonging to different geological contexts.

The example of the Ardèche Karst shows the development of a DFK and its evolution in a geomorphological context of a low plateau in the immediate vicinity of the Rhône Messinian canyon. In this context, the adaptation of the karstic drainage to the rising of the BL led to large horizontal karst networks, terraced *per ascensum* and partly fed by the groundwater flowing through the DFK.

The example of the Monts-de-Vaucluse Karst shows the development of a DFK in a high plateau geomorphological context. In this example, the upstream part of the networks was only slightly impacted by the BL variation. Only the downstream part (the deep drowned component) was clearly impacted with 1/ development of deep networks towards the bottom of the Messinian Rhône canyon, and 2/ adaptation of the DFK to the rise of the BL by enlargement of a deep phreatic lift, the Vaucluse spring.

The Port-Miou karst shows an example of coastal karst, also affected by eustatic variations. It illustrates, as the Fontaine-de-Vaucluse case study, a karst system that remains active at depth. Within this coastal karst, saline intrusion affects coastal groundwater. Freshwater flows nowadays in the inherited deep karst network where it

minimale durant les crues. Cette salinité n'est pas acquise par l'eau de mer remontant depuis la source mais bien plus en amont dans l'aquifère. Des mesures exceptionnelles ont été réalisées à l'aide des spéléo-plongeurs, qui ont pu embarquer une sonde CTD lors des plongées profondes dans le grand puits du réseau de Port-Miou. Les résultats d'une des plongées sont présentés dans la figure 7, allant jusqu'à 233 mètres de profondeur au cœur du karst. La salinité de l'eau est peu variable sur tout le conduit horizontal (valeur de conductivité électrique égale à 17 mS/cm, équivalent à une salinité de 10 g/l) jusqu'à 2 km de la mer, ainsi que dans le grand puits. Au fond du puits, le conduit karstique repart à l'horizontal et se trouve envahi par de l'eau salée à sa base (CE = 36 mS/cm, salinité = 23 g/l), signe d'une intrusion saline diffuse (figure 5). L'écoulement de l'eau initialement douce – dans ce réseau karstique à plusieurs centaines de mètres sous le niveau actuel de la mer – rend possible la rencontre du biseau salé et l'échange entre les deux masses d'eau. Ensuite, une fois le mélange réalisé, l'eau saumâtre reste confinée dans le conduit karstique jusqu'à la source, emportée par le gradient de charge hydraulique propre au système de conduits karstiques. La figure 4 montre également que lors des crues, la salinité n'atteint jamais une valeur nulle. C'est une des caractéristiques du karst de Port-Miou, l'augmentation de charge hydraulique n'est jamais suffisante pour bloquer totalement l'intrusion saline. Toutefois, sur d'autres systèmes karstiques profonds en zone côtière, l'eau de la source peut devenir douce sous l'effet des crues [voir les nombreuses références dans Fleury et al., 2007].

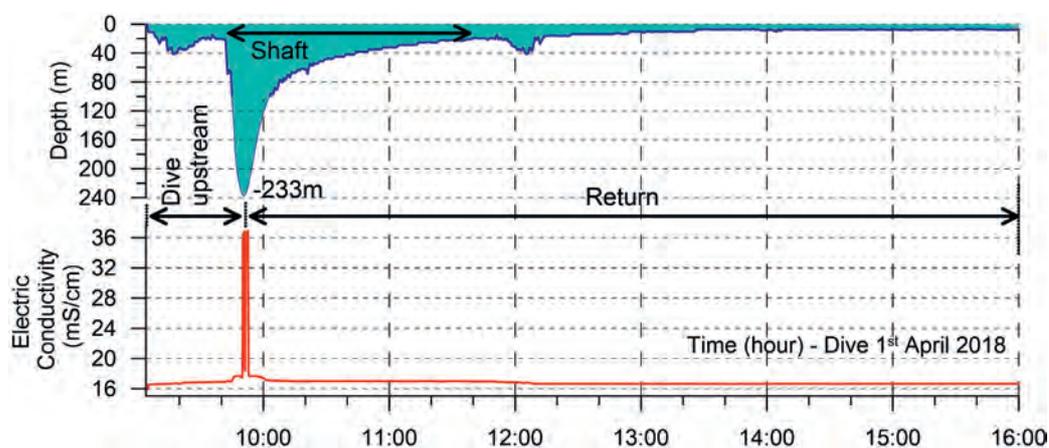
Conclusion

Au-delà des exemples présentés dans ce travail, la mise en place des karsts noyés profonds (KNP) en lien avec la crise de salinité messinienne est une caractéristique d'une grande partie des karsts péri-méditerranéens. L'une des conclusions qui a été acquise ces dernières années fut de comprendre le rôle des oscillations -descente et remontée- du niveau de base (NB) dans la formation des KNP. Pour illustrer cette dynamique structurante nous avons choisi de présenter des exemples de karst appartenant à des contextes géologiques très différents.

L'exemple de l'Ardèche montre la formation et l'évolution d'un KNP dans un contexte géomorphologique de bas plateau (altitude d'environ 400 m) à proximité immédiate du canyon messinien du Rhône. Dans ce contexte, l'adaptation du drainage karstique à la remontée du NB est très importante avec l'étagement *per ascensum* de grands réseaux horizontaux. Ces derniers sont en partie alimentés par les eaux en provenance du KNP.

L'exemple des Monts de Vaucluse montre la mise en place d'un KNP dans un contexte géomorphologique de haut plateau (altitude de plus de 800 m). Dans cet exemple, la partie amont des réseaux n'a que très faiblement été impactée par cette oscillation. Seule la partie aval (la composante noyée profonde) fut structurée par cette oscillation hors normes avec 1/ mise en place de réseaux profonds tributaires du canyon messinien du Rhône et 2/ adaptation du KNP à la remontée du NB par forçage hydrodynamique assurant le creusement d'un conduit vauclusien.

Figure 7: Specific electric conductivity and depth monitored with a CTD probe during a dive in the main karst conduit of the Port-Miou submarine spring (Dive of April 1st, 2018 performed by X. Méniscus). The dive started upstream from the submarine dam to end at the bottom of the deep shaft of Port-Miou located 2000 meters from the sea. See text for explanation.



Évolution au cours du temps de la conductivité électrique

de l'eau et de la profondeur de mesure d'une sonde CTD embarquée par un plongeur-spéléo faisant l'aller-retour à partir du barrage souterrain de Port-Miou jusqu'au fond du grand puits situé à 2000 m de la mer. Plongée du 1^{er} avril 2018 réalisée par X. Méniscus.

mixes with deep saline intrusion, before discharging to the sea at a shallow submarine spring.

These three examples highlight the importance of the water resource in karst aquifers. Deep karstification developed karst network over several hundred meters below the current groundwater outlet. This deep karstification creates a network of more or less interconnected voids between the recharge area and the present discharge zone, including flows over a large depth of the saturated zone. These voids constitute on the one hand a significant volume of water, and on the other hand they enhance the connection with the surrounding less permeable limestone matrix, thus increasing the stock of stored groundwater. The filling of the Messinian canyons has also favored the covering of the karstified limestones, thus making part of the karstic aquifer confined. This part of the aquifer is thus protected by a less permeable cover. It constitutes an additional water resource to the one that flows naturally to the springs. All the aquifers with deep karstification, whether they are unconfined or confined, constitute a real water resource. The management of this resource gives access to groundwater reserves with temporary overexploitation during the dry seasons, which is possible thanks to the rapid recharge during the intense Mediterranean rainfall events of the autumn. Surface karst features increases the aquifer's recharge capacity (and then decreasing runoff), and deep flooded karsts significantly increase the storage volume of the carbonate reservoir. However, in coastal areas, deep flows can increase natural contamination of freshwater by saline intrusion, which must be anticipated. In conclusion, in a context of global warming, the surface water resource will be impacted in the future by periods of reduced streams flow rate during low flow or drought, which reinforces the interest of karstic groundwater resources.

Le karst de Port-Miou montre un exemple de karst littoral, lui aussi affecté par les oscillations eustatiques de la crise de salinité. Il illustre, comme Fontaine de Vaucluse, un réseau karstique qui est resté actif en profondeur. Dans ce karst côtier, l'intrusion saline affecte les masses d'eau souterraines. L'écoulement de l'eau douce dans le réseau karstique hérité permet la rencontre en profondeur avec la masse d'eau de mer avant l'émergence.

Ces trois exemples mettent en lumière l'importance de la ressource en eau dans les aquifères karstiques. La karstification profonde a eu lieu sur plusieurs centaines de mètres de dénivellation, sous l'exutoire actuel des eaux souterraines. Cette karstification profonde créa un réseau de vides plus ou moins interconnectés entre la zone de recharge en surface et la zone de décharge actuelle, favorisant un écoulement en profondeur au sein de la zone saturée. Ces vides constituent d'une part un volume d'eau important, et d'autre part favorisent la connexion avec la matrice calcaire environnante moins perméable, augmentant ainsi le stock d'eau souterraine emmagasinée. Le remblaiement des canyons messiniens a également favorisé l'enfouissement des calcaires karstifiés, rendant ainsi captif une partie de l'aquifère karstique. Cette partie de l'aquifère est ainsi protégée par une couverture moins perméable. Elle constitue une ressource en eau supplémentaire à celle qui s'écoule naturellement aux sources.

L'ensemble des aquifères présentant une karstification profonde, qu'ils soient libres ou captifs, constitue une ressource en eau considérable. La gestion de cette ressource permet des périodes de surexploitation temporaires durant les saisons sèches, qui est possible grâce à la recharge rapide lors des événements pluvieux intenses méditerranéens de l'automne. Le karst de surface augmente la capacité de recharge de l'aquifère au détriment du ruissellement, et les karsts noyés profonds augmentent considérablement le volume de stockage du réservoir carbonaté. Toutefois en zone côtière, les écoulements profonds peuvent favoriser une contamination naturelle de l'eau douce par l'intrusion saline qu'il est nécessaire d'anticiper. Dans le contexte actuel du réchauffement climatique, la ressource en eau de surface se trouve déjà impactée par des périodes de diminution estivale du débit des cours d'eau, ce qui renforce d'autant plus l'intérêt des ressources en eau souterraine.

Acknowledgements

Cave-divers had an outstanding contribution to this work thanks to their exploration of the submarine spring of Port-Miou since the 1950's, and last data were recorded during dives managed by the teams supporting Xavier Méniscus, Frédéric Swierczynski, Alexandre Fox and Patrice Cabanel. This work was performed within the framework of the Port-Miou observation site, part of the KARST observatory network (www.sokarst.org) initiative from the INSU/CNRS, which aims to strengthen knowledge-sharing and promote cross-disciplinary research on karst systems. We also thank the "Conservatoire du Littoral", the Calanques National Park, the Cassis city and Météo-France. Research performed within the projects Karsteau.fr and Karst-Huveaune.

Remerciements

Merci aux plongeurs-spéléologues ayant contribué à l'exploration de la source de Port-Miou depuis les années 1950 jusqu'à aujourd'hui, sans qui une grande partie de ce travail n'aurait pas vu le jour, et tout particulièrement les équipes de plongeurs qui ont accompagnées Xavier Méniscus, Frédéric Swierczynski, Alexandre Fox et Patrice Cabanel pour acquérir les données récentes des sondes embarquées durant les plongées. Ce travail a été réalisé dans le cadre du site observatoire de Port-Miou, appartenant au réseau SNO KARST (www.sokarst.org) porté par INSU/CNRS, qui a pour objectifs de favoriser le partage de connaissances et promouvoir des recherches inter-disciplinaires sur les systèmes karstiques. Merci également au Conservatoire du Littoral, Parc National des Calanques et la ville de Cassis, ainsi que Météo-France. Recherches réalisées dans le cadre des projets Karsteau.fr et Karst-Huveaune.

Bibliography / Bibliographie

- ARFIB B. and CHARLIER J.-B., 2016** - Insights into saline intrusion and freshwater resources in coastal karstic aquifer using a lumped Rainfall-Discharge-Salinity model (the Port-Miou brackish spring, SE France). *Journal of Hydrology*, 540, 148-161. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.010>
- BACHE F., GARGANI J., SUC J. P., GORINI C., RABINEAU M., POPESCU S. M., ... & ASLANIAN D., 2015** - Messinian evaporite deposition during sea level rise in the Gulf of Lions (Western Mediterranean). *Marine and Petroleum Geology*, 66, 262-277. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.12.013>
- BEJANNIN S., VAN BEEK P., STIEGLITZ T., SOUHAUT M. and TAMBORSKI J., 2017** - Combining airborne thermal infrared images and radium isotopes to study submarine groundwater discharge along the French Mediterranean coastline. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 13. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.08.001>
- BEJANNIN S., TAMBORSKI J.J., VAN BEEK P., SOUHAUT M., STIEGLITZ T., RADAKOVITCH O., CLAUDE C., CONAN P., PUJO-PAY M., CRISPI O., LE ROY E. and ESTOURNEL C., 2020** - Nutrient fluxes associated with submarine groundwater discharge from karstic coastal aquifers (Côte Bleue, French Mediterranean Coastline). *Frontiers in Environmental Science* 7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00205>
- BESTANI L., ESPURT N., LAMARCHE J., BELLIER O. and HOLLENDER F., 2016** - Reconstruction of the Provence Chain evolution, southeastern France. *Tectonics* 35, 1-20. <https://doi.org/10.1002/2016TC004115>
- CAVALERA T., 2007** - Étude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port-Miou (Cassis, Bouches-du-Rhône). *Approche multicritère*. Thèse de doctorat. Université de Provence.
- CLAUDE C., COCKENPOT S., ARFIB B., MEULÉ S. and RADAKOVITCH O., 2019** - Accuracy and sensitivity of radium mass balances in assessing karstic submarine groundwater discharge in the stratified Calanque of Port-Miou (Mediterranean Sea). *Journal of Hydrology*. 10.1016/j.jhydrol.2019.124034
- CHUMAKOV I. S., 1973** - Pliocene and pleistocene deposits of the Nile valley in nubia and upper Egypt. In: Ryan, W.B.F. and Hsü, K. J., Eds., *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, volume 13: 1242-1243. Washington DC: US Government Printing Office.
- CLAUZON G., 1982** - Le canyon messinien du Rhône; une preuve décisive du "desiccated deep-basin model" (Hsue, Cita and Ryan, 1973). *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(3), 597-610.
- DAL SOGLIO L., 2019** - Hétérogénéité géologique, spéléogénèse et hydrodynamique du karst: du concept à la modélisation numérique, thèse de doctorat, Université d'Avignon.
- FLEURY P., BAKALOWICZ M. and DE MARSILY G., 2007** - Submarine springs and coastal karst aquifers: a review. *J. of Hydrol.* 339, 79-92. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.009>
- FOURNILLON A., 2012** - Modélisation géologique 3D et hydrodynamique appliquées aux réservoirs carbonatés karstiques: caractérisation des ressources en eau souterraine de l'Unité du Beausset (SE France). Thèse de doctorat. Aix-Marseille Université.
- GARCIA-SOLSONA E., GARCIA-ORELLANA J., MASQUE P., RODELLAS V., MEJIAS M., BALLESTEROS B. and DOMINGUEZ J.A., 2010** - Groundwater and nutrient discharge through karstic coastal springs (Castello, Spain). *Biogeosciences* 7, 2625-2638. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2625-2010>
- MÉNISCUS X., 2017** - Encore plus profond à Port-Miou - 233 m, *Spelunca* n°146, pp17-26
- MOCOCHAIN L., CLAUZON G., BIGOT J.-Y. & BRUNET P., 2006** - Geodynamic evolution of the peri-Mediterranean karst during the Messinian and the Pliocene: evidence from the Ardèche and Rhône Valley systems canyons, Southern France. *Sedimentary Geology*, 188, 219-233.
- MOCOCHAIN L., AUDRA P., CLAUZON G., BELLIER O., BIGOT J.-Y., PARIZE O. & MONTEIL P., 2009** - The effect of river dynamics induced by the Messinian Salinity Crisis on karst landscape and caves: example of the Lower Ardèche river (mid Rhône valley). *Geomorphology*, 106(1-2), 46-61.
- MOCOCHAIN L., AUDRA P. & BIGOT J.-Y., 2011** - Base level rise and per ascensum model of speleogenesis (PAMS). Interpretation of deep phreatic karsts, vaclusian springs and chimney-shafts. *Bulletin de la Société géologique de France*, 182(2), 87-93.
- RODELLAS V., GARCIA-ORELLANA J., MASQUE P., FELDMAN M. and WEINSTEIN Y., 2015** - Submarine groundwater discharge as a major source of nutrients to the Mediterranean Sea. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 112, 3926-3930. <https://doi.org/10.1073/pnas.1419049112>
- ROURE S., CLAUZON G., RUBINO J.-L., SÉRANNE M., CAMY-PEYRET J. et XAVIER J.-P., 2009** - L'incision Messinienne: Cartographie des canyons du Rhône et de la Durance: Processus et implications. *12^{ème} congrès de l'ASF*, 25-31 octobre 2009, Rennes.
- RYAN W. B., 2009** - Decoding the Mediterranean salinity crisis. *Sedimentology*, 56(1), 95-136. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.01031.x>
- TAMBORSKI J., VAN BEEK P., CONAN P., PUJO-PAY M., ODOBEL C., GHIGLIONE J., SEIDEL J.-L., ARFIB B., DIEGO-FELIU M., GARCIA-ORELLANA J., SZAFRAN A. and SOUHAUT M., 2020** - Submarine karstic springs as a source of nutrients and bioactive trace metals for the oligotrophic Northwest Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139106>
- TULIPANO L., FIDELIBUS D. and PANAGOPOULOS A. EDS., 2005** - *Groundwater management of karstic coastal aquifers*. European Commission- COST 621